

# 可充電無線感測網路最佳化充電器佈置與排程

## Optimized Charger Deployment and Scheduling for

### Wireless Rechargeable Sensor Networks

Chi-Ming Hong (洪啟銘)

國立中央大學資訊工程所

101522116@cc.ncu.edu.tw

Ji-Hau Liao (廖基豪)

國立中央大學資訊工程所

jigoxd@gmail.com

Jehn-Ruey Jiang (江振瑞)

國立中央大學資訊工程所

jrjiang@csie.ncu.edu.tw

#### 中文摘要

可充電無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs)利用無線充電器(wireless charger)適時補充裝有接收器(harvester)之感測節點電力。本論文目標為使用最少充電器佈建於感測網路環境中，並保證感測節點的永續性(sustainability)；設定充電器的啟動比例(active ratio)，減少電力浪費。本論文針對以上議題分別提出：(1) Adaptive Pair Based Greedy Cone Selecting (APB-GCS)，以每對節點產生的圓錐和該充電器對各感測節點的充電效益作為考量基礎，選擇最少數量的充電器覆蓋所有感測節點，使 WRSN 達到永續性。(2) High Charging Efficiency First Scheduling (HCEFS)，根據充電效益計算出各充電器工作比例，優先挑選感測節點總耗電最大的時刻進行排程，並根據感測節點剩餘電量的狀態以對充電器的工作排程進行調整，減少充電器的總耗電量。

模擬比較的結果證實 APB-GCS 可使用較少的充電器滿足所有感測節點的需求，且 HCEFS 可在確保 WRSN 永續性的條件下達成節省充電器總耗電量的目標。

**關鍵字：**可充電無線感測網路、充電效益、永續性、充電器佈建、工作排程

#### Abstract

Wireless Rechargeable Sensor Networks (WRSNs) use wireless charging technologies to supply sensors' power and maintain sustainability. This thesis discussed the deployment and scheduling of the wireless chargers in WRSNs. The target of wireless charger deployment is to use the fewest chargers on WRSNs deployment, to guarantee the sustainability of all sensor nodes. In addition, the target of scheduling is to calculate and schedule chargers' active ratios, resulting in the stability of all sensors' residual power, maintaining high charging efficiency in the system, and reducing the unnecessary power resources abuse. According to the issues above, we proposed: (1) Adaptive Pair Based Greedy Cone Selecting (APB-GCS), using adaptively adjusted node pairs and their charging efficiency, to minimize the number of chargers and fulfill all the sensors' demands. (2) High Charging Efficiency First Scheduling (HCEFS), based on the charging efficiency. We calculate the active ratio of every charger, and greedily select the timeslots of the most power consumption for scheduling chargers' active ratios. Then we modify chargers' active ratios calculated previously according to sensors' residual power.

Simulation results shown we can use fewer chargers to fulfill all sensors' demands. Moreover, we simulated the chargers' active ratios, and we can achieve the target of reducing chargers' power consumption in sustainable WRSNs.

**Keyword:** Wireless Rechargeable Sensor Network, Charging Efficiency, Sustainability, Charger Deployment, Active Ratio Scheduling

#### 一、緒論

無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSNs)由多個感測器組成，每個感測器節點具備環境感測的功能、無線通訊和簡單的計算能力且具備電力有限的電池。感測器節點能感測

環境狀況，以多跳(multi-hop)的無線通訊方式經過部分中間節點後將測到資訊回傳給匯集節點，達到監控環境變化的目的，如圖 1。

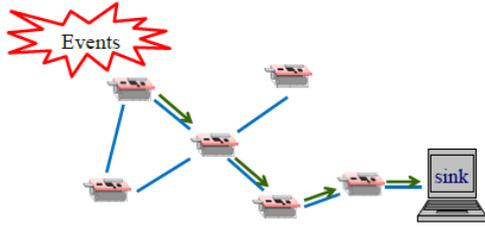


圖 1. 無線感測網路運作示意圖

無線感測網路面臨到的一個重要議題是能量效益(energy efficiency)，由於感測節點的電源供應僅限於節點上電池有限的電量，一旦電池的能源耗盡，該節點便無法進行感測環境與無線通訊等工作，視為感測節點覆蓋上的空洞(hole)，如圖 2。而資訊經多跳傳輸時碰上耗盡能量的感測節點將成為傳輸上的障礙，甚至發生網路分割(network partitioning)，導致感測網路的資訊無法傳回匯集節點。因此一個很重要的議題便是維護無線感測網路的永續性(sustainability)，如此可確保在每個時間感測節點捕捉特定事件無死角，也保障資訊傳輸路徑的暢通。

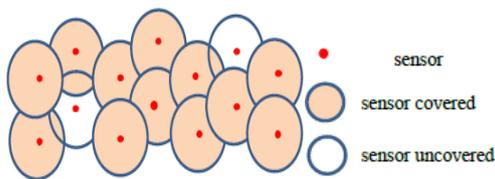


圖 2. 感測節點監測空洞

基於現今無線能量傳輸技術日益進步，有學者提出了可充電式無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs) [2][3][4]的概念，採用能量蒐集(energy harvesting)的技術[5][6]，使用能量接收器(energy harvester)蒐集太陽能、風力、輻射等能量並轉換成直流電(Direct Current, DC)，提供感測節點工作所需的能量。

若考慮無線感測網路的營運成本，長期下來充電器的能量耗費相當可觀，故本篇論文以最小化電力補給機制的整體耗能為目標將充

電器佈建在無線感測網路之中。此外，無線充電器的工作排班亦是值得探討的議題，減少無線充電器開啟的時間，在適當的時間點開啟以適時補充感測器能量。現今一般論文大多探討充電器的佈建，對充電器工作狀態的假設總是不間斷的輸出能量，但感測節點因其硬體限制，其能量的需求有限，因此若當感測節點接收能量達電池容量上限，充電器仍繼續提供電能，這些多餘能量長期累計下來將會是一筆可觀的數目。

有學者提出鋰電池充電累積能量的二次高斯函數近似模型[7]，藉由透過在定溫下模擬實際充電之行為，有效地描繪出隨著充電時間增加，鋰電池內所儲存的電能相對應的成長變化曲線。根據此模型可幫助我們制定並調整每個無線充電器的工作週期，在確保每個感測節點能維持永續性運作，可減少不必要的電力消耗與充電時間。

本論文的其他部分將分成以下各個章節：第二章說明研究的相關背景及文獻探討，第三章說明我們的問題描述與方法，第四章講述模擬，最後第五章提出結論與未來展望。

## 二、背景知識與相關研究

### 2.1 無線充電技術

所謂的無線充電亦即不須透過物理連結，便能將電力電能透過無線的方式傳輸出去。現今常見的無線充電技術有電磁感應(magnetic induction)、磁耦共振(magnetic resonance)[8]、無線電波射頻(radio frequency)[9]、雷射波束[10]。由於本篇論文探討耗電量較低的感測網路，感測節點眾多且四處分布，故採用無線電波射頻的充電機制，將無線充電器廣布在環境之中，即可得到良好的充電效益，維持無線感測網路的永續性。

無線電波射頻技術透過收集環境中的射頻能量，原理類似早期使用的礦石收音機，接收器搭載高效率接收電路，能接收環境中的電磁波能量，因射頻的穿透性高，且無方向性，不易受環境中障礙物影響。

本論文採用 Powercast 公司研發出將無線電波轉換成直流電的接收裝置[11]，充電設備中包含了電能發送器(transmitter)和電能蒐集裝置(energy harvester)，透過 915MHz 頻段把射頻能量發送出去；而接收器則接收射頻電波，儲存於裝置的電容中，其有效傳輸距離大約 5 到 6 公尺，適合中短距離的充電，常被用來給電池和能量存儲裝置充電。

## 2.2 鋰電池累積充電能量函數模型

該篇論文[7]統計了一顆鋰電池的模型，以電池組最終的能量極限值減去實驗樣本，得到鋰電池隨時間增加電池內部累積充電的電能變化曲線，並用二次高斯函數方程式將其模型推算出來，得到一有效方程式如下：

$$f(t) = C - A_1 * e^{-((t-B_1)/C_1)^2} + A_2 * e^{-((t-B_2)/C_2)^2}$$

其中 C 為電池組的能量極值，t 為充電時間， $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  則依不同規格的電池而有不同的變數。

## 2.3 可充電無線網路之充電器佈置

此篇論文[12]探討在室內環境中佈置可充電無線感測網路，因無線充電器的能量傳輸方向為指向性，將其充電空間(charging space)視為圓錐(cone)，以圓錐中充電效益的最小值代表整個圓錐；而無線感測網路的環境範圍定為立方體。無線充電器皆佈於天花板上的格子點上，論文中有規範格子點的大小，而感測節點則可散布在地面上或任意物體上。

針對可充電無線感測網路中的兩個重要議題：

1. 佈置最少的充電器覆蓋所有的感測節點
2. 制定合宜的充電器工作週期(duty cycle)

分別用貪婪法的方式提出基於節點的演算法 NB-GCS 和基於點對的演算法 PB-GCS，根據感測節點與網格的相對位置產生數個候選圓錐，再來挑選適當的圓錐覆蓋，並基於感測節點的工作負載與實際的充電效益提出了制訂無線充電器充電周期的方法，節省充電器的電力消耗。

## 三、假設與解法

### 3.1. 環境假設與問題定義

#### 3.1.1. 環境假設

本論文的环境假設與實驗內容參照自 [12]，不失一般性將欲佈建之無線感測網路環境空間視為一長方體，其長、寬、高分別為  $L$ 、 $W$ 、 $H$ ，無線充電器則被限制佈置於高度為  $H$  之網格上(grid point)，網格的邊長為  $G$ ，且每個網格上可佈置多個角度不同的無線充電器，以符合不同位置感測節點的需求，並將數個感測節點佈於地面或物體上，且假設已知感測節點的佈建位置，如圖 3 所示。

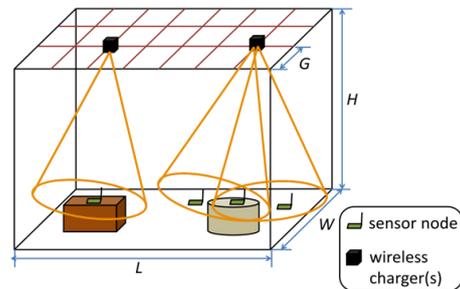


圖 3. 佈建環境示意圖

此外，不失一般性假設無線充電器的有效充電範圍(effective charging area)視為圓錐體(cone)，如圖 4，其有效充電距離  $R$  且角度門檻值  $\theta$ ，透過實驗可得知無線充電器的有效充電距離和角度門檻值。

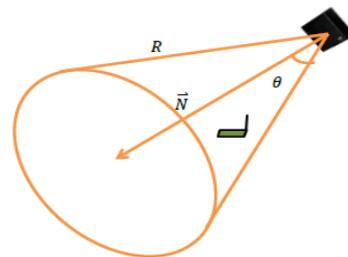


圖 4. 無線充電器有效充電區域及其參數

為了完成佈建後對充電器工作的排程，將時間軸階層式依序分為 period、cycle 和 timeslot，每段都是固定長度，如圖 5 所示。我們把一段長時間定做一個 period，作為每次統計感測節點耗電量的更新週期，也因此新的一天在不同時間的耗電狀況會依照感測節點的歷史耗電資訊做為參考。在每個 period 中切

成了若干個 cycle，決定充電器的啟動比例 (active ratio)，也就是在每個 cycle 的期間充電器要開多少時間。把每個 cycle 再細分成若干個 timeslot 作為排程充電器工作的基本單位，

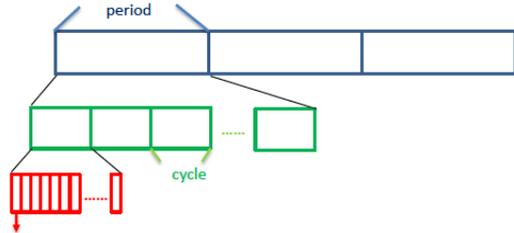


圖 5. 時間軸分割示意圖

### 3.1.2. 問題定義

本篇論文利用無線電磁波射頻傳輸能量的技術，預期利用最少無線充電器，佈建出一個具永續性(sustainability)無線感測網路的環境。由於充電器價格昂貴，佈建多餘充電器將導致硬體成本的花費可觀。此外若充電器工作週期長卻沒辦法得到應有的充電效益 (charging efficiency)，在能夠確保感測節點的永續利用下，此時反而考慮降低充電器工作週期，可避免不必要電力的浪費。

因此本論文欲達到的目標如下：

1. 在環境中佈建最少無線充電器覆蓋所有感測節點，滿足感測網路中所有感測節點的充電需求以維持其永續性。
2. 確保感測節點永續性之下制定充電器合宜的工作週期並排程。

### 3.2. 最佳化無線充電器的數量

本論文 APB-GCS 演算法可概括分成兩個階段，分別為產生候選圓錐的 APB-CCG (Adaptive Pair Based Candidate Cone Generation) 和從候選圓錐中挑選適當的圓錐佈建之 CE-GCS (Charging Efficiency Greedy Cone Selection)。從格子點出發，距離感測節點之間相對位置決定數個候選圓錐，接著再從眾多候選圓錐中優先挑出覆蓋到感測節點數量最多且充電效益最佳的圓錐。其中，充電效益根據感測節點與充電器的距離與角度利用實驗結果得到之充電效益趨勢線公式求得。

我們令  $n$  個感測節點的集合為  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ，令  $p$  個格子點所形成的集合為  $GP = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ ，其中  $p = \left(\left\lfloor \frac{L}{G} \right\rfloor + 1\right) * \left(\left\lfloor \frac{W}{G} \right\rfloor + 1\right)$ 。以下分別說明 AP-CCG 和 CE-GCS 演算法的細節。

#### 3.2.1. 生成候選圓錐

本論文提出可適應修正點對的方式產生候選圓錐的 AP-CCG (Adaptive Pair Candidate Cone Generating) 演算法，由於在一個格子點佈置充電器的有效充電範圍之所有情形會是一個以圓錐長度  $R$  為半徑的球體。故以  $g$  為球心  $R$ ，為半徑得一球體  $S$ ，如圖 6，並依照三大情形來討論候選圓錐的產生方式：

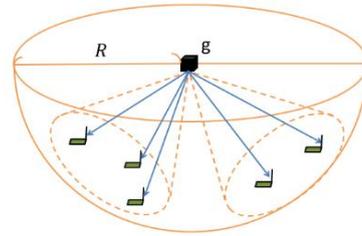


圖 6. 產生之球體 S

1. 若球體裡面沒有感測器，不產生圓錐。
2. 若球體裡僅有一個感測器，以格子點到感測器的向量作為對稱軸產生一圓錐。
3. 若球體裡有兩個以上感測器，以格子點到所有感測器的向量做對稱軸，再以兩兩對稱軸的夾角分三種情況來產生圓錐。為了便於探討，我們再以格子點為球心產生一個單位球面  $s$ ，參考圖 7。

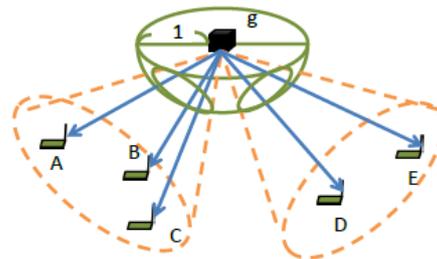


圖 7. 以單位球面解析

這時在  $S$  中產生的對稱軸對到單位球面  $s$  上會是一個點，判斷這些點兩兩的相對距離可再分成三種情況討論，如圖 8 所示。

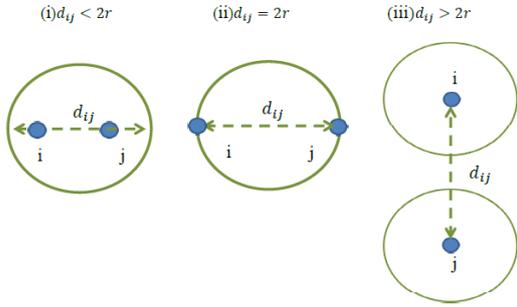


圖 8. 依照單位球面上的情形產生候選圓錐

- (a) 任兩點的距離  $<$  在單位球面上截圓的直徑  
取兩點的中心和格子點的向量為對稱軸  
產生一候選圓錐，若該候選圓錐包含  $m$   
個節點，再根據該  $m$  點離  $g$  之向量與距  
離調整候選圓錐之向量，如圖 9。
- (b) 任兩點距離  $=$  在單位球面上截圓的直徑  
取兩點的中心和格子點的向量為對稱軸  
產生一候選圓錐。
- (c) 任兩點距離  $>$  在單位球面上截圓的直徑  
分別取兩點和格子點的向量為對稱軸產  
生兩候選圓錐。

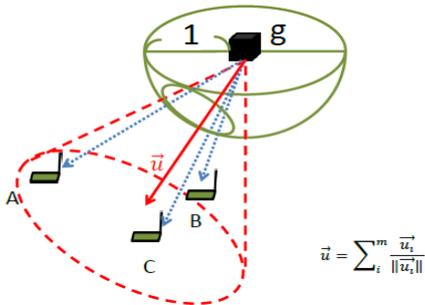


圖 9. 候選圓錐包含數個節點

產生候選圓錐後，再對它們進行挑選，  
目的希望用最少的圓錐覆蓋完所有的感測節  
點，並讓覆蓋後各充電器對感測節點的充電效  
益能滿足維持感測器永續性所需的電量需求。

Algorithm 1 : Adaptive Pair Based Candidate Cone Generation (APB-CCG)

Input:

$SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, CN = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, GP = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}, n, p, R, \theta$

Output:  $C$

Set all nodes in  $SN$  as unmarked; set cone set  $C$  and  $C^*$  as empty

For each grid point  $g$  do

$S$  = a sphere centered at  $g$  with radius  $R$

If ( $S$  covers 1 node  $s_{a_1}$ ) then

Generate  $\vec{u}_1 = \frac{gs_{a_1}}{\|gs_{a_1}\|}$  and add  $Cone(\vec{u}_1)$  into  $C$

Else If ( $S$  covers  $k, k > 1$ , nodes  $s_{a_1}, s_{a_2}, \dots, s_{a_k}$ )

then

Generates

$$\vec{u}_1 = \frac{gs_{a_1}}{\|gs_{a_1}\|}, \vec{u}_2 = \frac{gs_{a_2}}{\|gs_{a_2}\|}, \dots, \vec{u}_k = \frac{gs_{a_k}}{\|gs_{a_k}\|}$$

$\vec{u}_x$  is a vector going from  $g$  to  $s_{a_x}, 1 \leq x \leq k$

For  $x = 1, 2, \dots, k$  do

For  $y = 1, 2, \dots, k$  do

If ( $\angle(\vec{u}_x, \vec{u}_y) < \theta, x \neq y$ ),

For  $s_{a_x} \in Cone(\vec{u}_x, \vec{u}_y)$  and

$|Cone(\vec{u}_x, \vec{u}_y)| > |Cone(\vec{u}_x)|$

$$\vec{c}_x = \sum_i^m \frac{\vec{u}_i}{\|\vec{u}_i\|}$$

Add the cone  $\vec{c}_x$  into  $C$  indicated by (i)

Else If ( $\angle(\vec{u}_x, \vec{u}_y) = \theta, x \neq y$ ) then

Add the cone  $\vec{c}_x = \frac{\vec{u}_x + \vec{u}_y}{2}$  into  $C$  indicated by

(ii)

Else If ( $\angle(\vec{u}_x, \vec{u}_y) > \theta, x \neq y$ ) then

Add 2 cones  $\vec{c}_x, \vec{c}_y$  into  $C$  the indicated by (iii)

圖 10. AP-CCG 演算法

### 3.2.2. 挑選候選圓錐

考慮充電器對感測節點的充電效益的貪婪演算法 CE-GCS (Charging Efficiency Greedy Cone Selection)，依各感測節點工作充電需求，假設其電量需求率，在執行 APB-CCG 後，從產生的候選圓錐集合挑選出覆蓋到最多感測節點之圓錐，並將該圓錐所包含的感測節點之電量需求減去對該節點的充電效益，重複上述步驟直到所有感測節點電量需求皆被滿足。

Algorithm 2 : Charging Efficiency Greedy Cone Selection (CE-GCS)

Input:  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 、sensor demand

$\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$

Output:  $|C^*|$

```

Set  $C^* = C^* \cup \{w\}$  and  $C = C - \{w\}$ 
Repeat
  Select cone  $w$  covering the most uncovered sensor
  in  $SN$ 
  For every sensor node  $s_i$  covered by  $w$  do
     $CE_{s_i} = \text{calculate\_CE}(w, s_i)$ 
     $d_i = CE_{s_i}$ 
  If  $(d_i \leq 0)$  then mark  $s_i$ 
Until all nodes in  $SN$  are marked

```

圖 11. CE-GCS 演算法

由於電磁波在自由空間中傳輸，能量隨著所處位置的不同而有差異，我們計算感測節點位置實際的能量接收效益，而非僅用充電器充電範圍最差的充電效益作為代表。因此在挑選圓錐時，感測節點的充電需求更準確地被滿足，可減少真正被挑選的圓錐數量。

### 3.3. 無線充電器啟動比例與排程

根據 3.2 提出的 APB-GCS 演算法挑選出最佳的圓錐數量完成無線充電器佈建後，制定各個無線充電器的啟動比例(active ratio)並進行排程(scheduling)。提出高充電效益優先排程演算法(High Charging Efficiency First Scheduling, HCEFS)，以貪婪方式優先挑選每個充電器有效充電範圍之中感測節點總耗電最大的時刻進行工作排程。

#### 3.3.1. 計算無線充電器啟動比例

假設感測網路環境中有  $n$  個感測節點，共佈建了  $m$  個充電器， $T$  為一個 cycle 時間。為了使感測節點  $j$  在  $T$  時間內電量不會出現負成長，充電器  $i$  的工作時間必須滿足不等式：

$$CE_{i,j} \times t_i - \beta_j T \geq 0$$

$CE_{i,j}$  為充電器  $i$  對感測節點  $j$  的充電效益， $\beta$  為

$T$  時間內感測節點的工作耗電， $t_i$  即為在  $T$  時間內，無線充電器  $i$  需開啟充電的時間，故

$$\frac{t_i}{T} \geq \frac{\beta_j}{CE_{i,j}}。所以取啟動比例為  $\frac{t_i}{T} = \frac{\beta_j}{CE_{i,j}}$ ，即$$

$$AR_{i,j} = \frac{\beta_j}{CE_{i,j}}。$$

若當一個感測節點被數個充電器重複覆蓋，如圖 12，充電器若再採用前一步驟得到

之 active ratio 幫感測節點充電，則每一個 cycle 中感測節點從各充電器獲得的電能會增加，超出預期的充電需求，會造成額外的充電時間與能量浪費。因此計算不同充電器對感測節點對的 active ratio 後，依比例公平原則進行分配。

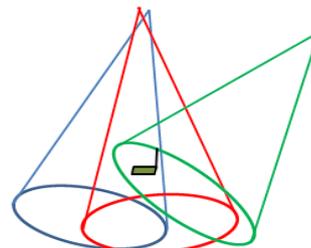


圖 12. 感測節點被多個充電器重複覆蓋

假設當一個感測節點  $s$  被  $k$  個充電器  $\{A_1, A_2, \dots, A_k | 1 \leq k \leq m\}$  重複覆蓋，對充電器  $A_k$  之 active ratio 修正的方程式如下：

$$AR_{A_k,s} \leftarrow \frac{AR_{A_k,s}}{\sum_{i=1}^k AR_{A_i,s}} \times AR_{A_k,s}$$

由於在演算法一開始時只考慮被一個充電器覆蓋時充電器的 active ratio，因此有可能會出現感測節點的耗電量過大，而該充電器放電一整個 cycle 都沒辦法將耗費的電能補充回來，即 active ratio > 1。但由於我們在 3.2 節提出的充電器佈建演算法已保證能維持感測器的永續性，代表 active ratio > 1 的狀況實際上有多个充電器重複覆蓋，之後考慮由多個充電器去分擔該感測節點需求，使最後得到 0 < active ratio < 1 的結果。

最後從每個充電器的候選 active ratio 集合中，挑選最大值作為該充電器的代表。

|  |
|--|
| Algorithm 3 : Active Ratio Calculating (ARC)   |
| Input: number of charger $a$ , number of sensor $b$ , a set of power consumption of each sensor $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_b\}$ |
| Output: $AR_a$   |

```

Initialize  $A_i = \emptyset, i=1, 2, \dots, b$ 
For charger  $i = 1, \dots, a$ 
For sensor  $j = 1, \dots, b$ 
 $CE_{i,j} = \text{calculate\_CE}(i,j)$ 

 $\text{candidate\_AR}_{i,j} = \frac{\beta_j}{CE_{i,j}}$ 

For sensor  $i = 1$  to  $b$ 
 $A_i =$ 
 $A_i \cup \text{cover}(s_i)$  //回傳覆蓋  $s_i$  之 charger
的 ID
For sensor  $i = 1, \dots, b$ 
For  $j = 1, \dots, |A_i|$  //sensor  $i$  被  $|A_i|$  個 charger 覆蓋
 $\text{candidate\_AR}_{j,i} \leftarrow \frac{\text{candidate\_AR}_{j,i}}{\sum_{j=1}^n \text{candidate\_AR}_{j,i}} \times \text{candidate\_AR}_{j,i}$ 
 $AR_a = \max\{\text{candidate\_AR}_{j,i} | \text{charger } i = 1, \dots, a, \text{sensor } j = 1, \dots, b\}$ 

```

圖 13. ARC 演算法

### 3.3.2. 定義感測節點電量門檻值

為了使感測節點接收能量維持在高充電效益，同時維持感測節點永續運作的電量，我們使用論文[9]提出的電池充電電量累積模型並制定感測節點電量門檻值  $TH_H$  和  $TH_L$ 。圖 14 為一個二次高斯近似模型模擬電池充電行為的電量變化。

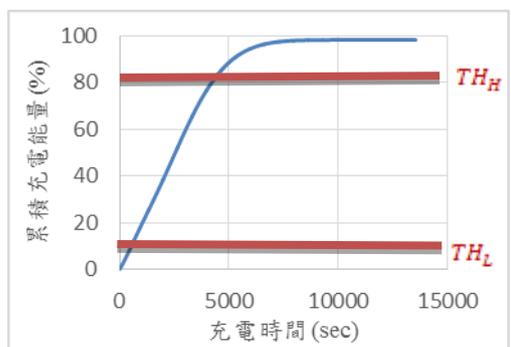


圖 14. 鋰電池累積充電能量模型

詳細求得門檻值的做法是採用上述電池模型求每個感測節點之充電效率近似曲線之斜率後，再微分一次求曲線增加之變化處，該處即訂為累積電量的高門檻  $TH_H$ 。此外，亦定義一個低門檻值  $TH_L$  做為啟動緊急補充電力機制的判斷指標，其求法定義為平均各感測節點在一個 cycle 最大之耗電量，目的在於避免到下一 cycle 之前感測節點剩餘電量就已耗盡。

### 3.3.3. 無線充電器啟動比例排程

假設感測節點傳輸回報剩餘電量資訊的週期固定且已知，每個 cycle 至少會回報一次剩餘電量，則每一個無線充電器根據其覆蓋到的所有感測節點個別算出當下 cycle 剩餘電量減去下一 cycle 的預估耗電量後並取所有感測節點中的最小值，與在 3.3.2 節得到的兩個門檻值  $TH_H$  和  $TH_L$  比較，可分成三種狀況討論：

1. 剩餘電量-耗電量  $\geq TH_H$   
確保在下一個 cycle 感測節點的電量不會過低，且在此階段充電器的充電效益較差，故充電器在下一個 cycle 不開啟，以避免浪費電力。
2.  $TH_L < \text{剩餘電量} - \text{耗電量} < TH_H$   
仍保證感測節點在下一個 cycle 能維持正常運作，且在此階段充電器的充電效益高，故採用 3.3.1 節估算出來充電器的 active ratio 進行排程。
3. 剩餘電量-耗電量  $\leq TH_L$   
充電器若依原先估計的 active ratio 幫感測節點充電無法補足其在下一個 cycle 的電量消耗，故在此階段進入緊急電力補充機制，亦即在下一個 cycle 充電器的 active ratio 變為 100%

當感測器剩餘電量減去預估耗電量的值介於兩門檻值  $TH_H$  和  $TH_L$  之間時，統計每個感測節點傳送資料封包所處於的 timeslot。在每一個 cycle 優先挑選最多感測節點在傳送資料的 timeslot，直到滿足先前算出的 active ratio，在該時刻讓無線充電器開啟幫其覆蓋範圍內的感測節點充電，以維持永續性。

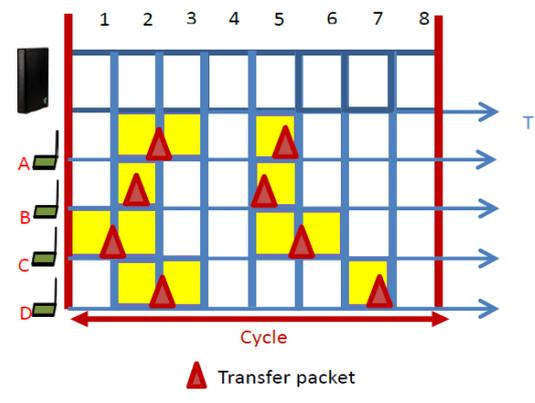


圖 15. 充電器啟動比例排程示意圖

在一 cycle 內感測節點傳送資料的時間點分布在不同 timeslot，如圖 15 所示，三角形代表感測節點回傳封包資訊的時間點。越多感測節點在相同時刻要傳送資訊時，其耗電量提升。

我們將感測節點回傳資訊的時刻所處的 timeslot 標記起來，以貪婪的方式優先挑選最多被標記的 timeslot 來進行排程，若不同 timeslot 被標記次數一樣多，則挑選較靠近已被挑選的 timeslot；而若挑完全部感測節點傳送資料的 timeslot，無線充電器在 cycle 時間內的啟動比例仍未分配完，則挑選最多感測節點傳送資料的後一個尚未被挑選的 timeslot，反覆進行以上挑選動作直到在一 cycle 時間內的所有被挑選到的 timeslot 時間總和等於無線充電器在該 cycle 時間的啟動比例。

為了說明 HCEFS 演算法，先定義兩組集合。集合  $X = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ，一開始存放一 cycle 中的所有 timeslot；而集合  $M$  用來存放標記後的 timeslot，其初始值為空集合。

|   |
|---|
| Algorithm: High Charging Efficiency First Scheduling (HCEFS)  |
| Input: power consumption $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ , residual power $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , sensor's transferring request $Req$ , $H_T, L_T$ , number of chargers $m$ , cycle time $T$ , $X = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ |
| Output: scheduling  |
| Initialize charging time = 0, $M = \emptyset$   |
| For sensor $i = 1$ to $n$   |
| for charger $j = 1$ to $m$  |
| If covered ( $charger_j, sensor_i$ ) = true   |
| If $P_i - \beta_i \leq TH_H$ do {   |
| while (charging time < $AR * T$ )   |
| { If $Req > 0$  |
| {   |
| If timeslot $t_b \in X$ has Max( Req) and   |
| $M = null$  |
| Select the timeslot $t_b$ which   |
| has Max( Req)   |
| $X = X - \{t_b\}$   |
| $M = M \cup \{t_b\}$  |

|   |
|---|
| Else if timeslot $t_b \in X$ has                    |
| Max( Req) and $M \neq null$                         |
| Select  |
| $t_b$ s. t. $\min t_a - t_b , t_a \in M, t_b \in X$ |
| $X = X - \{t_a\}$                                   |
| $M = M \cup \{t_b\}$                                |
| charging time += $T/n$ }                            |
| } }   |
| Else if $P_i - \beta_i \leq TH_L$                   |
| charging time = T                                   |

圖 16. HCEFS 演算法

## 四、模擬與分析

### 4.2.1. 模擬參數設定

表 1. 模擬參數設定

|                   |                               |
|-------------------|-------------------------------|
| 場地大小              | $20 \times 15m^2$             |
| 感測節點數量            | 50, 100, 150, 200, 250        |
| 有效充電距離            | 3.0m                          |
| 角度門檻值             | $30^\circ$                    |
| 佈置平面高度            | 2.3m                          |
| 網格邊長              | 1.8m                          |
| 感測節點平均耗電          | 0.1, 0.3, 0.5, 0.7mA          |
| 剩餘電量門檻值           | 800mAh (80%)、<br>100mAh (10%) |
| $TH_H \cdot TH_L$ |                               |
| Period 時間         | 24h                           |
| Cycle 時間          | 30min                         |
| Timeslot 時間       | 1min                          |

除了上述參數外，尚有以下的設定：

1. 無線充電器的有效充電距離及角度門檻值依照 4.1 節之實驗結果來制定。
2. 網格邊長的設定確保感測節點可至少在 2 個格子點上佈建的充電器覆蓋。
3. 感測節點在 x-y 平面上之分布遵守 Poisson Point Process，在 z 軸是 0 到 2.0m 的範圍下採亂數分布。
4. 本模擬採用 C++ 語言撰寫
5. 執行模擬 30 次後取平均得到結果

### 4.2.2. 模擬結果

#### 不同耗電狀況感測節點所需充電器數量

使用 APB-GCS 演算法，分析滿足不同工作量的感測節點所需的平均無線充電器數量，如圖 17 所示。

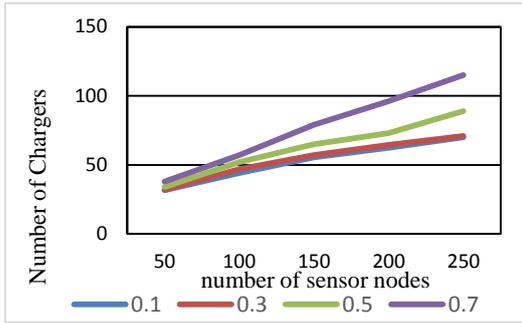


圖 17.不同耗電狀況感測節點所需充電器數量

由圖 17 可觀察感測節點工作量越大，對充電器數量的需求也較大，且隨著感測節點個數增加，充電器數量也幾近線性成長的趨勢。而觀察平均耗電 0.1mA 和 0.3mA 所需充電器數量的回歸趨勢線斜率相近，隨著耗電增加，所需充電器數量的回歸趨勢線斜率也增加。

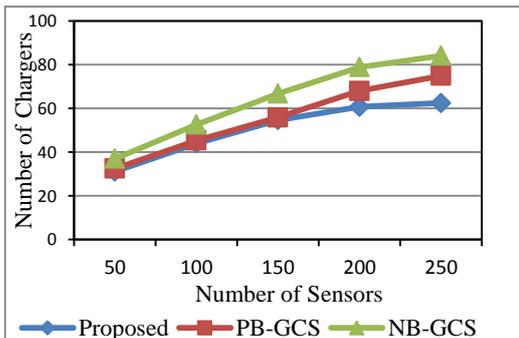


圖 18. 挑選充電器數量比較

相對於 NB-GCS 和 PB-GCS 採用充電器的有效充電範圍之中最差的充電效益作為該充電器覆蓋範圍之充電效益的代表值，而本篇論文提出的 APB-GCS 則是利用感測節點實際所在的位置得到的充電效益，保證會大於等於最差狀況，使得可以用較少的充電器即可滿足所有感測節點的充電需求，如圖 18 所示。

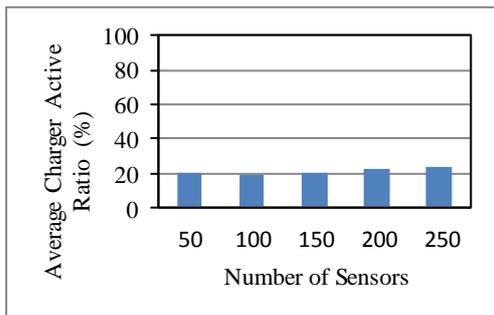


圖 19. 平均每個充電器的啟動比例

圖 19 顯示當感測節點數量越多，充電器重複覆蓋到的感測節點越多，該充電器的 active ratio 效益最差的感測節點為基準，有很大機率覆蓋較多感測節點之充電器的啟動比例比覆蓋到較少感測節點的充電器高。不論感測節點數量多寡，透過 APB-GCS 演算法佈建無線充電器後，可觀察到充電器啟動比例大約在 20%。

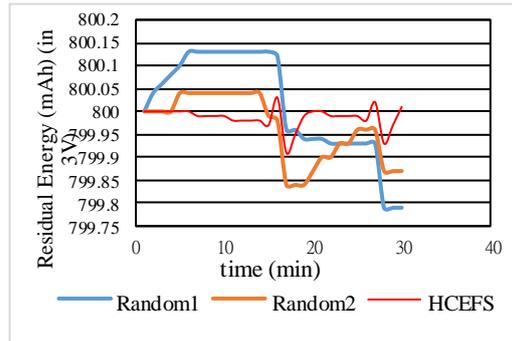


圖 20. 剩餘電量接近  $TH_H$  時的變化

圖 20 分析了感測節點電池剩餘電量在接近  $TH_H$  的變化，透過 HCEFS 排程可維持剩餘電量在相對穩定的狀態，且又當剩餘電量  $>TH_H$  時，充電效益差，當感測節點耗電一樣時，Random 方法得到的電量少，有可能在經過一 cycle 後剩餘電量會減少。

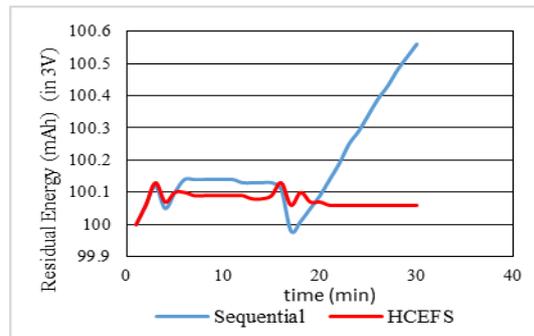


圖 21. 剩餘電量接近  $TH_L$  時的變化

圖 21 探討電池剩餘電量接近  $TH_L$  時的變化，我們分別分析透過 HCEFS 排程和循序充電的方式。由於循序充電感測節點的剩餘電量變化大，有很大機會剩餘電量低於  $TH_L$  以下而進入緊急電力補給機制，充電器開啟的時間變長，耗費的電力增加。

## 五、結論

本論文完成在可充電無線感測網路中使用最少無線充電器進行佈建，並完成後續營運的規劃。在佈建的演算法中考慮無線充電器對每個感測節點的相對位置得到的充電效益與感測節點本身的充電需求，由於電磁波的強度會隨著距離增加而成二次方衰減，根據此特性並透過一連串的實驗得到充電器有效充電範圍內對感測節點的充電效益，包含計算充電器的啟動比例並排程充電器開啟以幫感測節點充電的時間點。計算啟動比例時除了計算一個充電器對一個感測節點充電，也考慮了若有多個充電器同時覆蓋到一個感測節點，可適度減少這些充電器工作時間比例；而排程充電器的工作時間則利用貪婪法挑選同時間最多感測節點耗電的時間點，亦代表著系統總耗電最大的時刻。

## 參考文獻

- [1] P. Szczytowski, A. Khelil, N. Suri, "LEHP: Localized Energy Hole Profiling in Wireless Sensor Networks," *Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp.100-106, 2010.
- [2] S. He, J.-M. Chen, F. Jiang, D. Y. Yau, G. Xing, and Y.-X. X. Sun, "Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Proc. IEEE IFONCOM*, pp. 2006-2014, 2011.
- [3] T.-C. Chiu, Y.-Y. Shih, A.-C. Pang, J.-Y. Jeng, and P.-C. Hsiu, "Mobility-aware charger deployment for wireless rechargeable sensor networks," *Proc. Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp. 1-7, 2012.
- [4] K. Li, H. Luan, and C.-C. Shen, "Qi-Ferry: Energy-Constrained Wireless Charging in Wireless Sensor Networks," *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 2515–2520, 2012.
- [5] Y. K. Tan, and S. K. Panda, "Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable Wireless Sensor Network," *Proc. Sustainable Wireless Sensor Networks*, pp. 15-43, 2010.
- [6] E. Popovici, M. Magno, and S. Marinkovic, "Power Management Techniques for Wireless Sensor Networks: a Review," *Proc. 5th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*, pp. 194-198, 2013.
- [7] T. S. Lin and C. C. Weng, "Using a Quadratic Gaussian Function to Describe the Accumulated Charging Energy of a Lithium-Ion Battery," *Hwa Kang Journal of Engineering*, Vol. 27, pp. 141-147, 2011.
- [8] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, July 2007.
- [9] A. N. Parks, A. P. Sample, Yi Zhao, and J. R. Smith, "A Wireless Sensing Platform Utilizing Ambient RF Energy," *Proc. 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 69-74, 2011.
- [10] M. I. Afzal, W. Mahmood, and A. H. Akbar, "A Battery Recharge Model for WSNs using Free Space Optics (FSO)," *Proc. IEEE International Multitopic Conference (INMIC)*, pp. 272-277, 2008.
- [11] PowerCast website: <http://www.powercastco.com>
- [12] J.-H. Liao, W.-T. So, and J.-R. Jiang, "Optimized Charger Deployment for Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Proc. the 9th Workshop on Wireless, Ad hoc, and Sensor Networks (WASN'13)*, 2013.